

**“Diseño de un Controlador Adaptativo para el
Ajuste de Flujo de Aire en un Banco de Calibración
de Medidores de Gas”**

Oscar Yazit Salah García



Universidad Pontificia Bolivariana
Facultad de Ingeniería Electrónica
Especialización en Control e Instrumentación Industrial
Bucaramanga, Julio de 2012

“Diseño de un Controlador Adaptativo para el
Ajuste de Flujo de Aire en un Banco de Calibración
de Medidores de Gas”

Oscar Yazit Salah García

Monografía de Grado

PhD. Omar Pinzón Ardila
Director



Universidad Pontificia Bolivariana
Facultad de Ingeniería Electrónica
Especialización en Control e Instrumentación Industrial
Bucaramanga, Julio de 2012

TABLA DE CONTENIDO

1.	BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS	10
2.	SISTEMA DE CONTROL DE FLUJO DE AIRE	13
2.1.	LAZO DE CONTROL	13
2.2.	PLANTEAMIENTO DEL CONTROL ADAPTATIVO	15
2.3.	EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL CONTROL ADAPTATIVO.....	19
3.	CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN.....	20
3.1.	PROTOCOLO DE PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN.....	20
3.2.	CARACTERIZACIÓN	22
3.2.1.	CURVAS DE RESPUESTA AL ESCALÓN	22
3.2.2.	CURVAS PRESIÓN VS CAUDAL.....	24
3.3.	IDENTIFICACIÓN	26
4.	DISEÑO CONTROLADOR ADAPTATIVO.....	27
4.1.1.	ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA CONTROLADO.....	28
4.1.2.	CONSIDERACIONES SOBRE LA NO LINEALIDAD DEL SISTEMA.....	28
4.1.3.	DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO	29
5.	SIMULACIÓN DE RESULTADOS.....	36
6.	IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA	40
7.	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	43
8.	REFERENCIAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultados de calibración.....	11
Figura 2. Sistema de medición.....	12
Figura 3. Lazo de control de caudal de aire.....	14
Figura 4. Diagrama de bloques del lazo de control de caudal	15
Figura 5. Curva de “Respuesta al escalón”	17
Figura 6. Curva de “Pérdida de presión vs Caudal”	17
Figura 7. Esquema de Control Adaptativo tipo “Gain Schedule”	18
Figura 8 Señales de ENTRADA – Corriente (mA)	23
Figura 9 Señales de SALIDA - Caudal (m ³ /h)	23
Figura 10 Curvas de Presión (mbar) vs Caudal (m ³ /h)	25
Figura 11 Curvas de Presión (mbar) vs Caudal (m ³ /h) (Acercamiento).	25
Figura 12 Respuesta al Escalón de las funciones de transferencia ajustadas.	27
Figura 13 Esquema final del Control Adaptativo “Gain Schedule”	30
Figura 14. Ejemplo de muestreo de la curva “Caída de Presión vs Caudal” actual.	34
Figura 15. Curva “Caída de Presión vs Caudal” es de una proporción de α =0.3.....	37
Figura 16. Respuesta del sistema controlado, con adaptación a punto de operación 400 m ³ /h, con una carga que genera un α =0.3.....	38
Figura 17. Respuesta del sistema controlado, con adaptación a punto de operación 400 m ³ /h, con una carga que genera un α =0.3.....	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pruebas Propuestas	21
Tabla 2. Funciones de transferencia ajustadas a cada caso	26
Tabla 3. Intervalo de operación por tramos	29
Tabla 4. Constantes PID de controladores ajustados para $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$	31
Tabla 5. Especificaciones conseguidas con los controladores sintonizados.	32
Tabla 6 Ecuaciones Cuadráticas que representan “Caída de Presión vs Caudal” del sistema sin carga $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ escenario extremo con carga. ...	32
Tabla 7. Variación del los parámetros PID para ajustarse al punto de operación.....	38
Tabla 8 Variación del los parámetros PID para ajustarse al punto de operación.....	39

Nota de Aceptación

Firma de Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, 11 de Agosto de 2012

AGRADECIMIENTOS

OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar un controlador adaptativo que permita ajustar el flujo de aire en los diferentes escenarios operativos de un banco de calibración de medidores de gas.

Objetivos Específicos

- Documentar cada uno de los componentes del lazo de control del flujo de aire en el banco de calibración de medidores.
- Realizar la identificación del modelo de la planta a controlar
- Diseñar un control adaptativo que ajuste las constantes del controlador de flujo de aire.
- Validar los resultados mediante un software de simulación.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: *“DISEÑO DE UN CONTROLADOR ADAPTATIVO PARA EL AJUSTE DE FLUJO DE AIRE EN UN BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS”*

AUTOR: OSCAR YAZIT SALAH GARCÍA

FACULTAD: *INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESP. EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL*

DIRECTOR: OMAR PINZÓN ARDILA

RESUMEN

En este trabajo se hace un una propuesta muy específica de una aplicación del control de procesos enfocada a mejorar el desempeño de una de las etapas que componen un banco de calibración de medidores volumétricos de gas como lo es la etapa de generación del flujo de aire. Este sistema posee la característica de ser no lineal dadas las características propias de sistemas de generación de flujo y variante en el tiempo debido a que cada medidor que se instala para ser calibrado modifica las características de la planta. Sin embargo se requiere que el desempeño del sistema controlado sea el mismo a pesar de dichas variaciones y por esta razón se aborda el control adaptativo como una solución al problema. Para esto se realizan una serie de pruebas de caracterización del sistema y basándose en los datos obtenidos donde se realiza un proceso de análisis y de diseño de un controlador que brinda al sistema las especificaciones requeridas. Finalmente se hace una validación de la solución obtenida por medio de una simulación.

PALABRAS CLAVE: Identificación de sistemas, Controlador PID, Control Adaptativo, Flujo de Aire, Pérdidas de Presión, Banco de Calibración.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT OF THESIS PROJECT

TITLE: “DESIGN OF AN ADAPTIVE CONTROL FOR SETTING OF AIR FLOW IN A CALIBRATION BENCH FOR GAS METERS”

AUTHOR: OSCAR YAZIT SALAH GARCÍA

FACULTY: ELECTRONICAL ENGINEERING
CONTROL AND INDUSTRIAL INSTRUMENTATION

DIRECTOR: OMAR PINZÓN ARDILA

ABSTRACT

In this work a very specific proposal of a process control application aimed at improving the performance of one the stages that make up a calibration bench for volumetric gas meters as the air flow generation system. This system has the characteristic of being non-linear because it is a characteristic of flow generation systems and variation in time because each meter installed to be calibrated makes that the characteristics of the plant does change. However, the performance of the controlled system is the same even though such variations and therefore addresses the adaptive control as a solution. For this was performed a series of characterization tests of the system and based on data obtained through a process of analysis and design of a controller that provides to the system the required specifications. Finally, a validation of the solution obtained by a simulation.

KEY WORDS: System identification, PID controller, Adaptive control, Air flow generation, Pressure Losses, Calibration bench

V° B° THESIS DIRECTOR

INTRODUCCIÓN

Una de las etapas más importante de un banco de calibración de medidores volumétricos de gas es la etapa de generación del flujo usado como medio de comparación entre el medidor patrón y el medidor bajo prueba. Su relevancia recae en el hecho de que la calibración de un medidor se realiza a diferentes valores de caudal o flujo volumétrico (m^3/h). En particular el banco objeto de este trabajo utiliza como gas de calibración flujo de aire a condiciones cercanas a las atmosféricas. Para generar tal flujo se usa un ventilador radial de alta presión (también conocido como *blower*) , para cuantificarlo se usa un medidor de gas tipo rotativo y para su ajuste es indispensable una etapa de control.

Estos valores de caudal de calibración se podrían ajustar de manera rápida y precisa mediante el uso de un controlador PID y un lazo de control con los dispositivos adecuados de no ser porque la planta del proceso varía cada vez que se instala un medidor para ser calibrado. De esta característica de variación de la planta nace el requerimiento de un controlador adaptativo que permita ajustar los caudales de calibración manteniendo unas especificaciones de control deseadas a pesar de los diferentes escenarios operativos previstos para el banco de calibración.

En este trabajo se describe paso a paso el desarrollo de un conjunto de actividades que van desde el conocimiento del sistema y sus limitaciones, un planteamiento de un controlador adaptativo y sus características de funcionamiento, algunas pruebas experimentales de caracterización e identificación y unas decisiones de diseño que llevaron a concretar la solución planteada . Con el fin de mostrar los resultados se muestran unas simulaciones de algunos casos de funcionamiento. Finalmente se presenta

un procedimiento propuesto para implementar en la práctica el controlador adaptativo.

1. BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS

El banco de calibración se construye y se automatiza para realizar con él un proceso de “calibración” que está definido en el ámbito de la metrología como: “operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación” [1].

En particular el propósito para el cual se construyó el banco en mención es el de establecer la relación entre las mediciones de volumen entregadas por un medidor gas bajo prueba, ya sea tipo rotativo, tipo turbina o tipo diafragma, y los valores de volumen determinados por un patrón, que para este caso es de tipo rotativo. El resultado o relación obtenida es el error de medición del medidor bajo prueba y el modelo matemático está dado por la Ecuación 1, acorde a lo indicado en el reglamento de pruebas PTB tomo 4 [2]. Esta expresión calcula el error llevando las mediciones de volumen del medidor patrón al estado termodinámico del medidor bajo prueba, razón por la cual el modelo requiere de valores obtenidos de diferentes instrumentos de medida de presión y temperatura ubicados en puntos específicos del banco de calibración.

$$E[\%] = \left[\left(\frac{V_m}{V_p} \cdot \left(\frac{P_m \cdot (T_p + 273,15)}{P_p \cdot (T_m + 273,15)} \right) \cdot \left(1 + \frac{\%ep}{100} \right) \right) - 1 \right] \times 100$$

Ecuación 1. Modelo matemático del error de medición del medidor bajo prueba.

Donde:

- E [%] Porcentaje de error en la indicación del medidor
- V_m [dm³] Volumen registrado por el medidor
- V_p [dm³] Volumen registrado por el patrón
- P_m [mbar] Presión Absoluta del fluido de calibración en el medidor
- P_p [mbar] Presión Absoluta del fluido de calibración en el patrón
- T_p [°C] Temperatura del fluido de calibración en el patrón
- T_m [°C] Temperatura del fluido de calibración en el medidor
- $\%ep$ [%E] Porcentaje de error del medidor patrón

Una vez se finaliza el proceso de calibración se realiza un análisis de los datos obtenidos en el proceso, se obtiene una curva del error de medición con su incertidumbre asociada y los resultados son emitidos en un certificado o informe de calibración para cuando se instale el medidor sea posible hacer ajuste o corrección sobre sus mediciones.

No	Caudal m ³ /h	Volumen m ³	Error %	Desv. Est. %	U %	k -	DP mbar
1	127,5	7,00	0,66	0,030	0,30	1,97	-0,02
2	204,1	11,00	0,08	0,007	0,29	1,97	-0,02
3	357,0	18,00	0,38	0,023	0,29	1,97	-0,02
4	509,9	26,00	0,86	0,016	0,29	1,97	-0,02
Repetibilidad Máxima							0,030
Máximo Error Pico-Pico ($Q_{max} \geq *Qt$)							0,78
Máximo Error ($Q_{min} \leq *Qt$)							-1000,00
Máximo Error ($Q_{max} \geq *Qt$)							0,86
*Qt \leq 0,2 · Qmax							

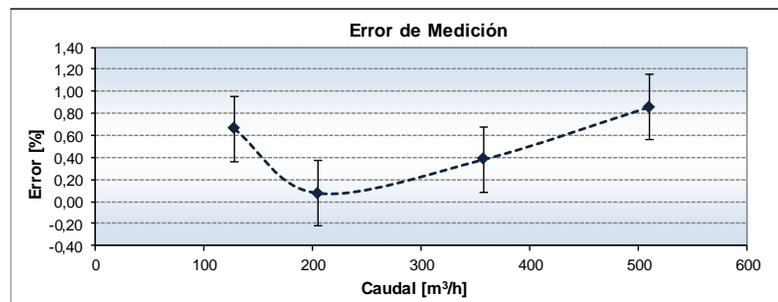


Figura 1. Resultados de calibración

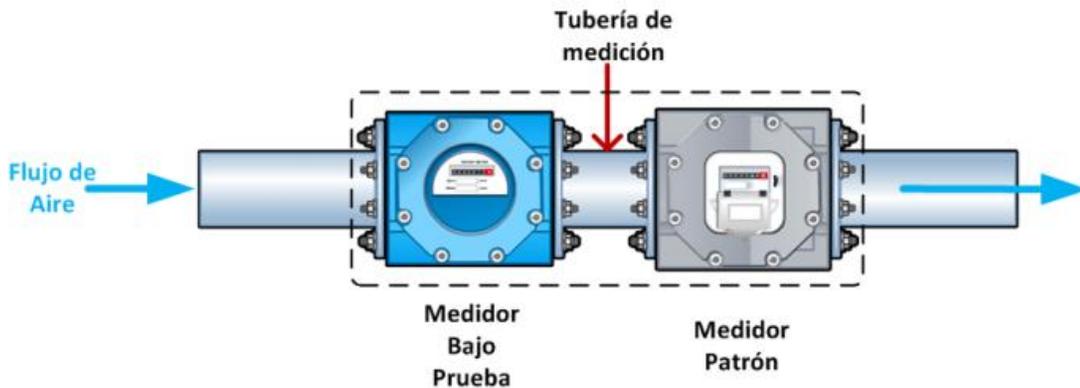


Figura 2. Sistema de medición

La calibración de medidores usando un sistema como el descrito anteriormente se basa en el principio de conservación de la masa aplicado al volumen de control circunscrito por: 1) el patrón de referencia, 2) las tuberías y accesorios asociados a la facilidad entre el patrón y el medidor en prueba y, por supuesto, 3) el medidor en prueba (delimitado por recuadro en la Figura 2). Para que este modelo funcione de manera confiable se debe garantizar la hermeticidad entre el patrón de referencia y el medidor en prueba, y se han tenido en cuenta los efectos de la acumulación de masa, derivados de la variación respecto al tiempo de la densidad del gas fluido de calibración al interior de las secciones ubicadas entre el patrón y el medidor en prueba, situación que es mitigada manteniendo estabilidad en las condiciones de humedad, temperatura y presión de la calibración.

Las comparaciones en volumen se realizan a diferentes caudales y para finalizar la descripción del banco es importante dar a conocer varios aspectos importantes relacionados con ésta variable. En este caso particular el caudal es la cantidad de fluido, expresado en volumen, que pasa a través de una sección transversal de referencia por unidad de tiempo (m^3/h). El caudal que pasa por una sección del sistema de medición (ver Figura 2) se obtiene

midiendo simultáneamente volumen y tiempo. El volumen se totaliza en el medidor patrón y el tiempo es medido por la plataforma de automatización. El intervalo de calibración del banco esta definido por caudales de 3 a 650 m³/h. Los valores de caudal que deben ser ejecutados en una prueba están especificados en las normas de referencia para la calibración de los tipos de medidores de interés como son *ANSI B109.1*, *ANSI B109.2*, *ANSI B109.3*, *OIML R137-1* y *AGA 7*[3][4][5][6][7][8]. Adicionalmente en estas normas se especifican las variaciones permitidas (precisión) para dichos caudales de calibración. Con el fin de obtener estos flujos de aire el banco posee un sistema de generación de caudal compuesto por un ventilador radial de alta presión (*blower*) y un sistema de control. El *blower* está especificado para alcanzar caudales del intervalo de calibración y con capacidad vencer la caída de presión presupuesta para el sistema de medición a condiciones de operación definidas. El sistema de control cumple la función de ajustar cada uno de los caudales de calibración y brinda precisión y rapidez en la consecución del caudal de consigna.

2. SISTEMA DE CONTROL DE FLUJO DE AIRE

2.1. LAZO DE CONTROL

El sistema de control de interés es el encargado de ajustar los diferentes valores de flujo de aire involucrados en una calibración. El lazo de control de este sistema está configurado como se muestra en la Figura 3. El algoritmo de control está programado en un controlador PAC (Programmable Automation Controller) de OPTO22™. La variable controlada es medida a partir del volumen entregado por un medidor de gas tipo rotativo y totalizada en una unidad de tiempo fija para obtener así caudal. La variable manipulada

para el control de caudal es la velocidad del motor razón, por la cual se cuenta con un variador de velocidad como una etapa intermedia.

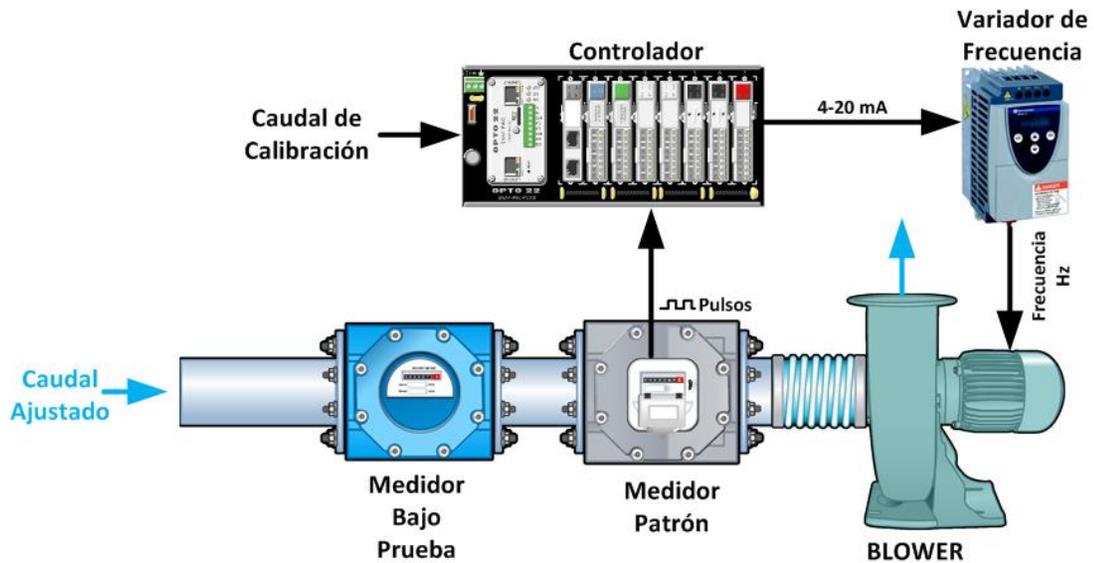


Figura 3. Lazo de control de caudal de aire

Para efectos de esta propuesta se define la planta como el conjunto de dispositivos compuesto por el variador de frecuencia, el blower, la tubería, el medidor patrón y el medidor bajo prueba. De esta planta permanecen invariantes (inamovibles) el variador, el blower, un tramo de tubería y el medidor patrón, pero el medidor bajo prueba siempre es diferente. Este hecho hace que la planta físicamente cambie y matemáticamente su función de transferencia también. Así que si se realiza un proceso de caracterización del total de la planta y diseña un controlador PID, ajustado con unas constantes específicas, solo funcionará para un caso de calibración determinado y el desempeño para casos diferentes será desconocido.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL CONTROL ADAPTATIVO

Mediante una serie de procedimientos, de pruebas de caracterización, de un análisis de los datos adquiridos y mediante el uso de las herramientas provistas por Matlab® para la identificación de sistemas y de sintonización de controladores se planteó llevar a cabo el diseño de un controlador para el sistema de ajuste de flujo de aire. El objetivo final es que el sistema controlado cumpla con unas especificaciones (tiempo de asentamiento, porcentaje de sobrepaso y error en estado estacionario) deseadas en cualquiera de los escenarios operativos previstos para ese tipo de banco de calibraciones.

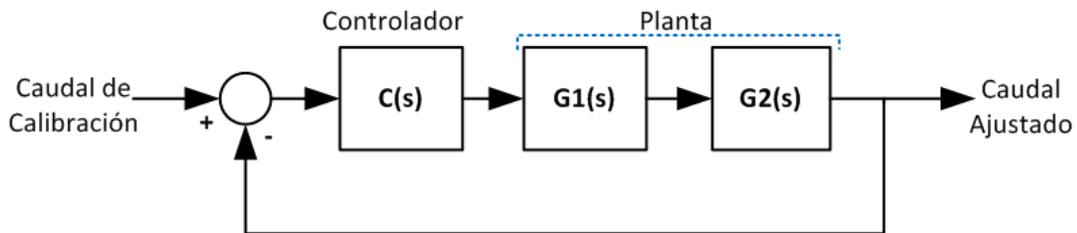


Figura 4. Diagrama de bloques del lazo de control de caudal

De manera más específica se busca que el controlador resultante permita al sistema responder de manera adecuada ante la variación en el tiempo propia del mismo. Para este fin se parte partir de varias definiciones y algunas observaciones previas.

En primer lugar se divide la planta del proceso en dos funciones de transferencia como se observa en la Figura 4, donde $G_1(s)$ se llama a la parte invariante en el tiempo y $G_2(s)$ a la parte de medidor bajo prueba o la parte que es variante.

Luego, de acuerdo a los recursos disponibles en el banco (instrumentos de medida y capacidad de procesamiento) se determina que la dinámica de este sistema de flujo se puede caracterizar por medio de cualquiera de las curvas de la Figura 5 y Figura 6. La primera es la respuesta al escalón que se obtiene para este caso estimulando el sistema en lazo abierto con un valor de corriente de entre 4 y 20mA y registrando los valores de caudal de la respuesta transitoria. La segunda curva “caudal vs pérdida de presión” que puede obtenerse con el sistema en lazo cerrado o en lazo abierto, únicamente variando el caudal y tomando valores de presión en una ubicación estratégica dentro del banco. De esta forma se puede obtener, mediante en cada tipo de caracterización una curva para el sistema $G_1(s)$ (roja) y otra para sistema $G_1(s)G_2(s)$ (azul) tal y como se observa en la Figura 5 y la Figura 6.

Ante la posibilidad de adquirir este tipo de curvas, se plantea ajustar un controlador PID para este lazo, para el caso en el que la planta está compuesta únicamente por $G_1(s)$, sin instalar un medidor ($G_2(s)=1$). Luego sintonizar un controlador para el caso mas exigente de $G_1(s)G_2(s)$. Posteriormente con los controladores debidamente sintonizados se propone un control adaptativo que ajuste las constantes PID en función de las exigencias de la planta completa que resulte cada vez que se instale un medidor bajo prueba.

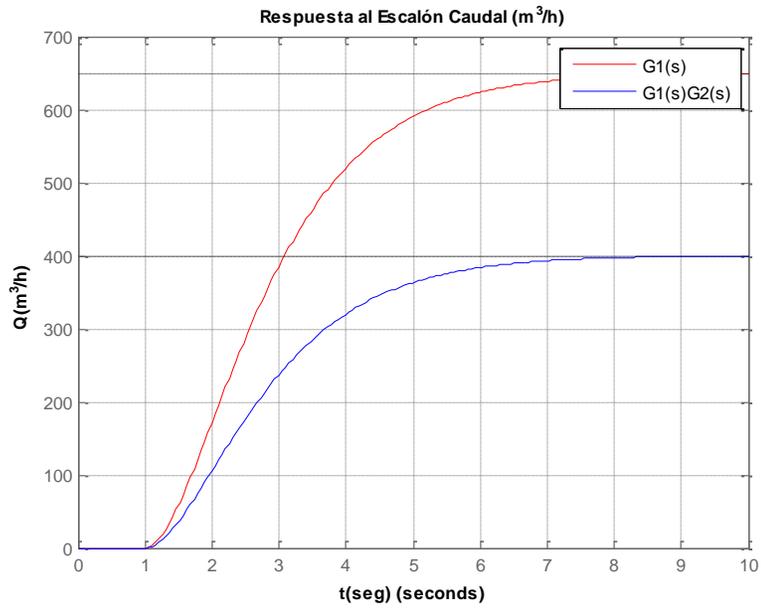


Figura 5. Curva de “Respuesta al escalón”

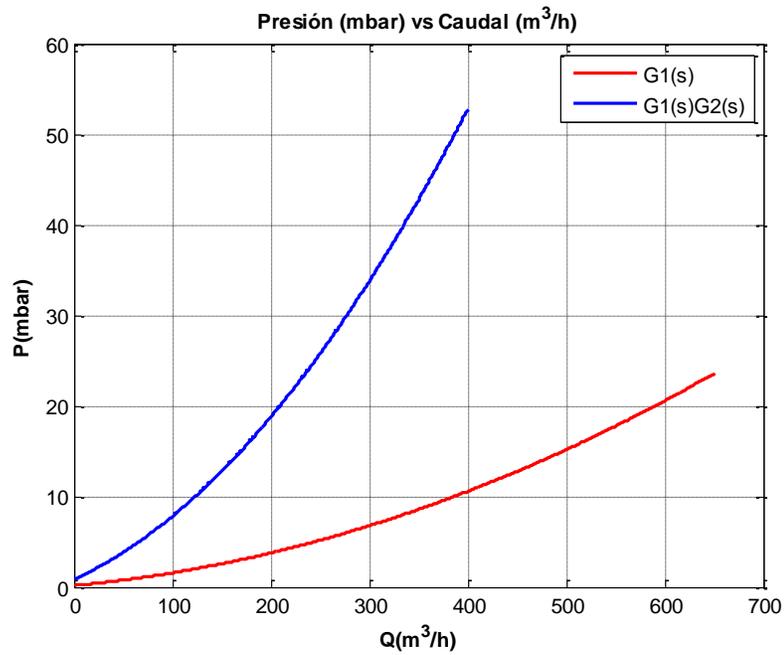


Figura 6. Curva de “Pérdida de presión vs Caudal”

Para que se pueda desarrollar esta idea se requiere definir el tipo de controlador adaptativo que se va a usar y el mecanismo para variar los parámetros PID. Dentro de los tipos de control adaptativo clásicos, se decidió usar un controlador tipo “Gain Schedule” o control de ganancia programada, que funciona en un esquema como el que se muestra en la Figura 7. Este esquema se usa en aplicaciones en donde es posible medir variables que están directamente correlacionadas con cambios en la dinámica del proceso y de acuerdo a las mediciones, cambiar los parámetros del controlador.

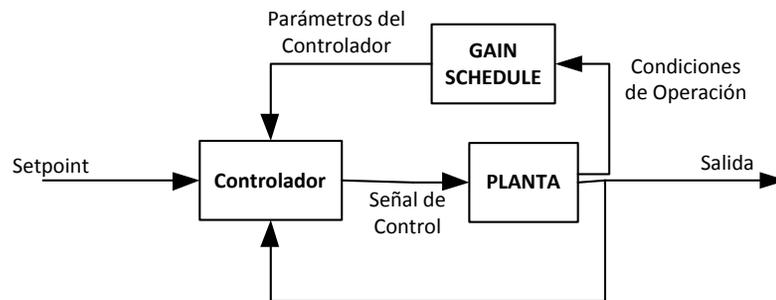


Figura 7. Esquema de Control Adpatativo tipo “Gain Schedule”

En conocimiento de lo anterior se define que el controlador adaptativo “Gain Schedule” aquí propuesto debe variar las constantes del controlador PID en función a los cambios de la curva de “pérdida de presión vs caudal” de $G_1(s)G_2(s)$ respecto al mismo tipo de curva que caracterizada el caso $G_1(s)$ (en donde $G_2(s)=1$).

Para que el control adaptativo varíe estas constantes PID del controlador base debe definirse el esquema y las reglas de específicas de funcionamiento para lo cual se llevó a cabo un procedimiento diseño.

2.3. EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL CONTROL ADAPTATIVO

La forma detallada como debe operar el controlador adaptativo es el resultado que busca establecer este trabajo y para ello se definió un procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a) Considerando que se posee la instrumentación adecuada para hacerlo se realizó un proceso de identificación de la planta $G_1(s)$ y la versión de la planta $G_1(s)G_2(s)$ que se considera el más crítico de los casos (máximo flujo que logra la planta con la máxima restricción). Para cada caso se adquirió simultáneamente la “respuesta al escalón” y la curva “pérdida de presión vs caudal”.
- b) Mediante un análisis de los datos experimentales conseguidos y haciendo uso de la herramienta “Ident” de Matlab® se determina un modelo para la planta en cada uno de los casos.
- c) A partir de éstas plantas y teniendo como fin la obtención de unas especificaciones de control deseadas, y haciendo uso de la herramienta “Sisotool” de Matlab®, se sintonizaron los respectivos controladores para cada caso.
- d) Un análisis de las funciones de transferencia de los controladores obtenidos permitió conocer en que forma variaron los parámetros PID del controlador sintonizado para el caso $G_1(s)G_2(s)$ con respecto a las constantes PID al controlador sintonizado para el caso $G_1(s)$.

- e) Se realizó un análisis de las curvas “pérdida de presión vs caudal” obtenidas con el fin de establecer un parámetro que permite cuantificar la variación del sistema $G_1(s)G_2(s)$ con respecto $G_1(s)$.
- f) Basado en las conclusiones de los numerales d) y e) se establecieron las reglas de funcionamiento del control adaptativo.
- g) Finalmente mediante simulaciones del sistema bajo los escenarios planteados se validan los resultados encontrados y el desempeño que se puede lograr.

3. CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN.

3.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN.

Mediante un proceso de caracterización se hace la captura de las curvas respuesta al escalón “caudal m^3/h vs corriente mA” y de “caída de presión mbar vs caudal m^3/h ” de manera simultánea. En esta etapa se toman estas curvas para escenarios diferentes, primero para el sistema $G_1(s)$ al que se denomina escenario sin carga y luego para el caso $G_1(s)G_2(s)$ más extremo (cuando el sistema es capaz de generar el máximo valor de caudal, 650 m^3/h , con la mayor restricción del flujo) al que se le va a llama escenario con carga. Las curvas planteadas se adquirieron para cuatro escenarios mediante cuatro pruebas que se enlistan en la Tabla 1.

Esc. Nro.	Nombre de la Prueba	Significado		F. de tranf. Planta
		Carga	Caudal	
1	$N_L Q_H$ _____	Sin Carga	Alto 650 m ³ /h	$G_1(s)$
2	$N_L Q_L$ _____	Sin Carga	Bajo 100 m ³ /h	$G_1(s)$
3	$W_L Q_H$ _____	Con Carga	Alto 343 m ³ /h	$G_1(s)G_2(s)$
4	$W_L Q_L$ _____	Con Carga	Bajo 55 m ³ /h	$G_1(s)G_2(s)$

Tabla 1. Pruebas Propuestas

Para hacer la caracterización del sistema bajo diferentes escenarios y obtener la información de manera organizada, se estableció y se siguió el siguiente protocolo de pruebas:

1. Ajustar el controlador en modo manual para que la caracterización del sistema sea en lazo abierto.
2. A partir de un experimento de prueba y error buscar los valores de corriente (mA) con los cuales se logra obtener el caudal alto (650 m³/h) y el caudal bajo (100 m³/h) sin carga.
3. Obtener la respuesta al escalón de estos caudales, sin carga (pruebas $N_L Q_H$ y $N_L Q_L$ respectivamente).
4. Simultáneamente obtener las respectivas curvas de “caudal m³/h vs caída de presión mbar” sin carga.
5. Buscar el peor de los casos 650 m³/h con 20 mA mediante la variación de una restricción del flujo.
6. Obtener la respuesta al escalón con carga (pruebas $W_L Q_H$ y $W_L Q_L$ respectivamente) con los valores de corriente obtenidos en el numeral 2.

7. Simultáneamente obtener las respectivas curvas de “caudal m^3/h vs caída de presión mbar” con carga.

3.2. CARACTERIZACIÓN

3.2.1. CURVAS DE RESPUESTA AL ESCALÓN

Siguiendo el protocolo de pruebas anteriormente descrito se lograron adquirir las curvas requeridas desarrollo del control adaptativo. En la Figura 8 se observan las entradas tipo escalón usadas como entrada o estímulo. Los valores de corriente (encontrados en la ejecución del numeral 2. del protocolo) fueron 13,201 mA para los casos $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$, y 5,546 mA para los casos $N_L Q_L$ y $W_L Q_L$. Las curvas obtenidas como respuesta son las que se observan en la Figura 9.

De un análisis a estas curvas se logran obtener algunas conclusiones que nos muestran un aspecto del problema que no se había previsto al comienzo de este trabajo. La Figura 9 permite observar que el sistema “no es lineal” ya que se comporta de forma diferente en los caudales más altos que en los caudales bajos. Esto implica nuevos requerimientos en el diseño del control adaptativo objetivo ya que éste deberá responder ante las variaciones en el tiempo previstas que son atribuidas a los cambios del medidor a calibrar y adicionalmente ante el comportamiento no lineal del sistema. Por esta razón a partir de esta etapa se decide aplicar el procedimiento planteado en la sección 2.3 tanto para los datos tomados a bajos caudales como los tomados a bajos caudales.

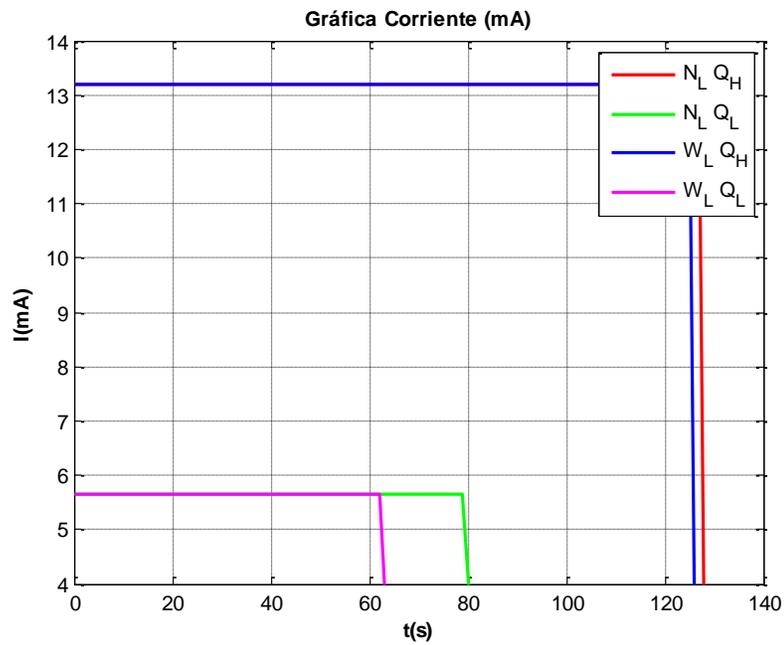


Figura 8 Señales de ENTRADA – Corriente (mA)

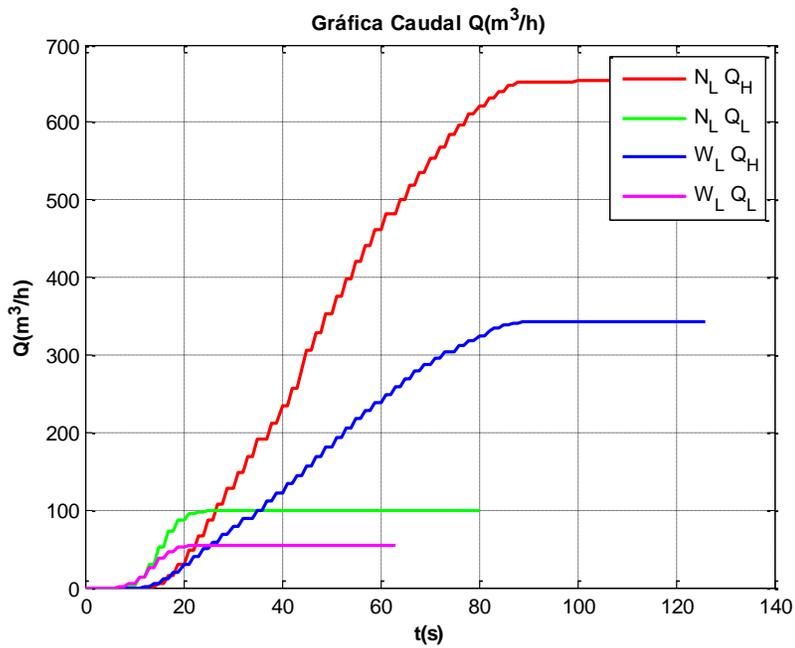


Figura 9 Señales de SALIDA - Caudal (m³/h)

3.2.2. CURVAS PRESIÓN VS CAUDAL

De manera simultánea se realizaron medidas de presión a la entrada del medidor patrón, de esta manera se logran las curvas de desempeño que se observan en la Figura 10 y Figura 11.

Las curvas resultantes fueron analizadas y se obtienen las algunas conclusiones importantes. En primera medida se obtuvo que como era previsto y como lo muestran las curvas para $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ es posible lograr curvas características para el sistema con carga y para el sistema sin carga. Por otra parte se observan aspectos que pueden restringir o incidir en el diseño del controlador propuesto. El primero de ellos se observa cuando el sistema se encuentra operando a bajos caudales, dado que en este caso las mediciones que se hacen de caída de presión en los sistemas con y sin carga no muestran una diferencia apreciable entre sí, como se observa en la Figura 11, y de esta manera se hace imposible lograr distinguir, por este método, entre un caso y otro. Este hecho, que puede atribuirse al tiempo de respuesta del transmisor o al tiempo de muestreo usado para la adquisición de las señales de presión, es un parámetro de diseño que debe servir para acotar el funcionamiento del control adaptativo en las etapas que siguen. El otro aspecto encontrado son variaciones aleatorias de los valores de presión a partir de determinados caudales, como los que se aprecian en la curva $N_L Q_H$ desde los 600 m³/h de la Figura 10. Es importante tomar medidas para que el control sea inmune a esta clase de fenómenos.

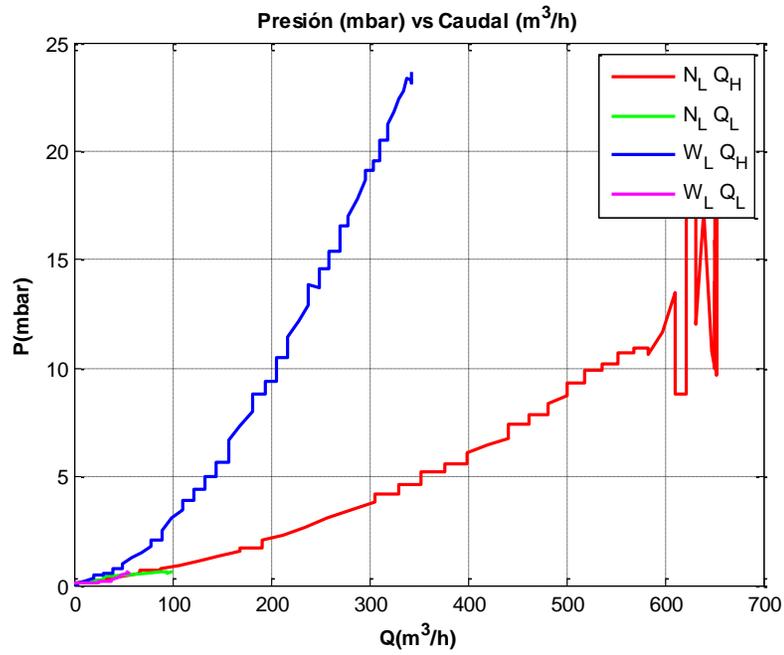


Figura 10 Curvas de Presión (mbar) vs Caudal (m³/h)

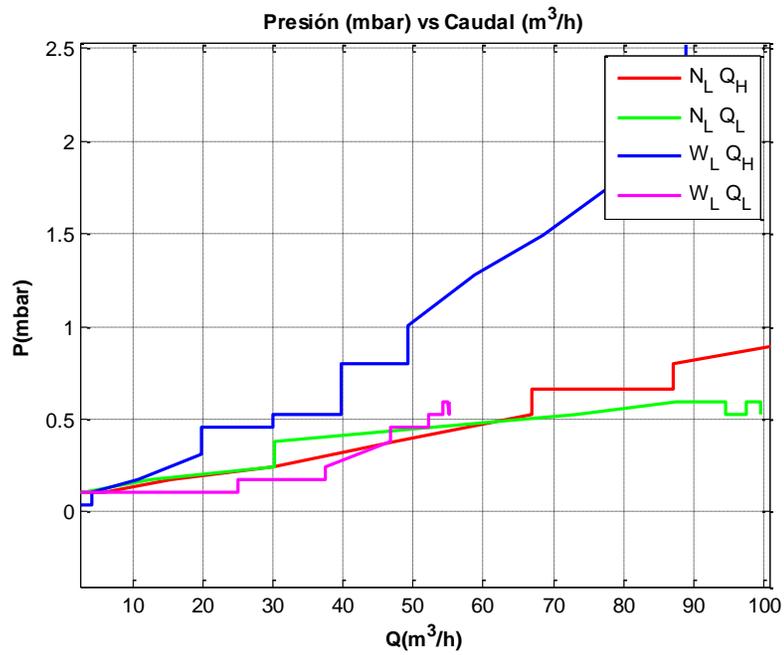


Figura 11 Curvas de Presión (mbar) vs Caudal (m³/h) (Acercamiento).

3.3. IDENTIFICACIÓN

Una vez obtenidas las respuestas al escalón (con datos de entrada y datos de salida) que caracterizan a cada uno de los escenarios de funcionamiento (acorde a Tabla 1), se procede a usar la herramienta Ident® de Matlab® con el fin de encontrar la función de transferencia que mejor se ajuste o represente cada uno de éstos.

No.	Nombre de la Prueba	Funciones de Transferencia	% Ajuste
1	$N_L Q_H$ 	$G_1(s) = \frac{-0.1687s^3 + 1.076s^2 - 1.563s + 0.1702}{s^3 + 2.069s^2 + 0.1392s + 0.003363}$	92,07%
2	$N_L Q_L$ 	$G_2(s) = \frac{17.6s^2 - 11s + 2.292}{13.01s^4 + 13.94s^3 + 6.328s^2 + 1.382s + 0.1302}$	93,59%
3	$W_L Q_H$ 	$G_3(s) = \frac{0.52 * (-0.1687s^3 + 1.076s^2 - 1.563s + 0.1702)}{s^3 + 2.069s^2 + 0.1392s + 0.003363}$	91,43%
4	$W_L Q_L$ 	$G_4(s) = \frac{0.551 * (17.6s^2 - 11s + 2.292)}{13.01s^4 + 15.36s^3 + 7.599s^2 + 1.777s + 0.1793}$	92,31%

Tabla 2. Funciones de transferencia ajustadas a cada caso

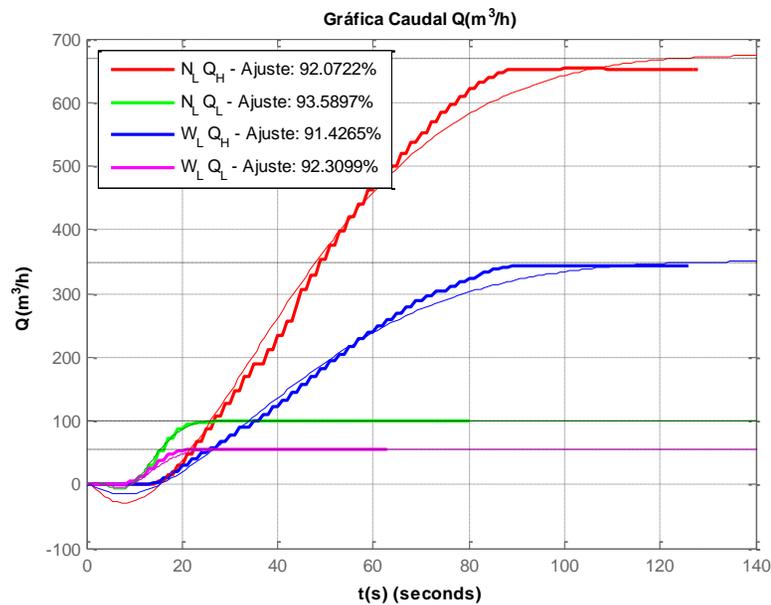


Figura 12 Respuesta al Escalón de las funciones de transferencia ajustadas.

4. DISEÑO CONTROLADOR ADAPTATIVO

Una vez se ha realizado el proceso de caracterización e identificación de las funciones de transferencia y un análisis de los resultados obtenidos se procedió a realizar el diseño del control. El diseño se inició con la descripción de la respuesta que se desea obtener del sistema mediante unas especificaciones del sistema controlado. Adicionalmente en este punto de partida se requiere definir las acciones que debe tomar el control adaptativo para responder a la no linealidad del sistema observada a partir de la caracterización. Finalmente se mediante un conjunto de decisiones se concretó cada uno de los mecanismos que le dan la operatividad al control adaptativo propuesto.

4.1.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA CONTROLADO

Es importante antes de iniciar el diseño hacer las respectivas acotaciones al problema y definir las especificaciones que se desea finalmente obtener.

De este modo se establece que el sistema controlado va a operar con flujo de aire a condiciones atmosféricas ($P_{atm}=905$ mbar y $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$). El intervalo de operación del sistema es desde $65\text{ m}^3/\text{h}$ a $650\text{ m}^3/\text{h}$.

El desarrollo busca que cuando este en funcionamiento el controlador propuesto el sistema sea rápido en el ajuste de caudal, sea preciso y se logre establecer en el valor deseado y que no se sobrepase, en caudal, el intervalo de operación de los medidores patrones. Por esta razón se establece como objetivo, para sistema controlado, un tiempo de establecimiento igual o menor a 180 segundos, cero porciento de sobrepaso y error en estado estable igual a cero.

4.1.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA NO LINEALIDAD DEL SISTEMA

Como se mencionó en la sección 3.2.1 el sistema no es solo variante en el tiempo sino que evidentemente es “no lineal”. La no linealidad observa en las respuestas al escalón ya que es diferente en los altos caudales que en los bajos como se observa en la Figura 12. Adicionalmente se confirma en las funciones de transferencia resultado del proceso de identificación que para los casos $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ (altos caudales) muestran una linealidad entre si, para $N_L Q_L$ y $W_L Q_L$ (altos bajos) también muestran una linealidad entre si como se muestra en la Tabla 2, pero entre los caudales altos y bajos la relación no es lineal.

Esto plantea un nuevo requerimiento y es que el mecanismo adaptativo debe variar las constantes PID no solo en función a las mediciones que haga de la caída de presión sino que además debe actuar dependiendo del valor de caudal que se tenga como consigna. Para esto se determina que el control va a trabajar dividiendo el intervalo de operación en pequeños tramos donde el funcionamiento sea aproximadamente lineal y de esta forma asignar un controlador PID a cada tramo. Es indispensable trabajar sobre varios tramos para que el control trabaje de manera adecuada, sin embargo en este trabajo se va a trabajar solo sobre dos tramos debido a que solo se cuenta con los datos experimentales mostrados en el capítulo 3. De acuerdo a esto se define los valores que acotan cada tramo como se muestra en la Tabla 3. El funcionamiento específico se muestra en detalle en la fase de diseño a continuación.

Tabla 3. Intervalo de operación por tramos

Tramo	Valores de Caudal Q	
Tramo 1	$65 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 300 \text{ m}^3/\text{h}$	Caudales Altos
Tramo 2	$300 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q < 650 \text{ m}^3/\text{h}$	Caudales Bajos

4.1.3. DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO

Como se estableció la sección 2.2 se utiliza el esquema control adaptativo “Gain Schedule” mostrado en la Figura 7. Ese esquema puede ser visto como dos lazos. Un lazo interno con un controlador PID cuyas constantes se pueden variar y un lazo externo con el bloque “Gain Schedule” con el mecanismo para variar las constantes PID.

Las variables de entrada a este al bloque “Gain Schedule” (ver Figura 13) son medidas de algunas condiciones de proceso. En este caso particular van

a ser medidas de la “Caída de presión” y el valor del “Caudal” de consigna (set point). Con las mediciones de “Caída de presión” se deben tomar acciones para mitigar la variación en el tiempo, a lo que se va a definir como “Mecanismo VT”. Con el dato del “Caudal” de consigna se responde ante la no linealidad del sistema a lo que se definió como “Mecanismo NL”.

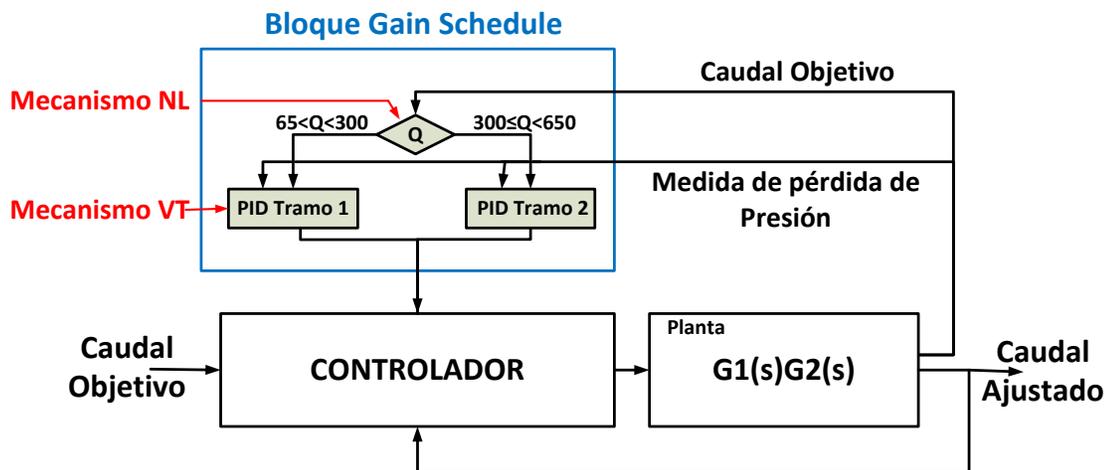


Figura 13 Esquema final del Control Adaptativo “Gain Schedule”

El “mecanismo NL” es sencillamente un algoritmo que evalúa a cual de los tramos dentro del intervalo de operación pertenece el valor de “Caudal Objetivo” para asignar un controlador PID.

El “mecanismo VT” es el tipo de operación del control adaptativo que motivó la realización de este trabajo y como se planteó en la sección 2.2 consiste en variar las constantes un controlador PID en función a los cambios de la curva de “pérdida de presión vs caudal” de $G_1(s)G_2(s)$ respecto al mismo tipo de curva que caracteriza el caso $G_1(s)$ (en donde $G_2(s)=1$).

Como se observa en la Figura 13 se usa el mecanismo para ajustar las constantes de dos controladores PID, uno asociado al “Tramo 1” y otro al “Tramo 2”.

Para describir el modo en el que opera este mecanismo se explica como se desarrolló para el PID del “Tramo 1” y luego se traslada la idea para el desarrollo del PID del “Tramo 2”(o para el PID del “Tramo n-esimo” en el caso de implementen mas tramos). EL PID del “Tramo 1” está relacionado con los “altos caudales”, o lo que es igual, con las curvas y las funciones de transferencia de los escenarios $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ (sin carga y escenario extremo con carga).

Lo primero que se hizo fue sintonizar un controlador PID para cada caso. Mediante la herramienta “sisotool” se obtuvieron dos controladores PID robustos que satisfacen las especificaciones del sistema controlado descritas en la sección 4.1.1 y los valores de sus parámetros se muestran en la Tabla 4.

Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$PID_{N_L Q_H}$ ———	$G_1(s)$	0.0225086	0.0005471	0.14365532
$PID_{W_L Q_H}$ ———	$G_1(s)G_2(s)$	0.0432858	0.0010522	0.27626022

Tabla 4. Constantes PID de controladores ajustados para $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$.

Sistema	Planta	Ts[s]	%OS	%EeEE
---------	--------	-------	-----	-------

	(Escenario)			
$N_L Q_H$ 	$G_1(s)$	164	4.89	0
$W_L Q_H$ 	$G_1(s)G_2(s)$	164	4.89	0

Tabla 5. Especificaciones conseguidas con los controladores sintonizados.

Con la obtención de estos controladores se establecieron los valores máximo y mínimo en los que deben estar K_p , K_i y K_d , pero se requiere definir en que proporción deben variarse estas constantes ante un punto de operación cualquiera del banco de calibración (para casos intermedios de $G_1(s)G_2(s)$).

Para este fin se requirió definir cual es la relación entre los PID sintonizados y las curvas características de “Caída de presión mbar vs caudal m^3/h ” de los escenarios $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ (sin carga y con carga respectivamente) que se observan en Figura 10. Para este fin se requería un modelo matemático de dichas curvas por lo que se realizó una regresión cuadrática que dio como resultado las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6. Es importante recordar en este punto que la ventaja de estas curvas es que representan todo el intervalo de operación en caudal, por lo que simplemente se les llama N_L y W_L .

Curva	Ecuación Cuadrática “Caída de Presión vs Caudal”
N_L 	$P_{N_L}(Q) = 0.000023988356861 \cdot Q^2 + 0.005337561807363 \cdot Q + 0.085914577077779$
W_L 	$P_{W_L}(Q) = 0.000143995649265 \cdot Q^2 + 0.019863375098562 \cdot Q - 0.156656952365881$

Tabla 6 Ecuaciones Cuadráticas que representan “Caída de Presión vs Caudal” del sistema sin carga $N_L Q_H$ y $W_L Q_H$ escenario extremo con carga.

Con los controladores PID del “Tramo 1” sintonizados y las ecuaciones de las curvas de “Caída de Presión” se estableció la siguiente relación:

$$PID_{N_L Q_H} \text{ ————— } \text{equivale a } P_{N_L}(Q)$$

$$PID_{W_L Q_H} \text{ ————— } \text{equivale a } P_{W_L}(Q)$$

El significado de esta relación es “un medidor bajo prueba va estar representado por una curva “Caída de Presión vs Caudal” intermedia entre las curvas $P_{N_L}(Q)$ y $P_{W_L}(Q)$ para lo cual el “Mecanismo VT” va a variar las constantes K_p , K_i y K_d del controlador entre los valores de $PID_{N_L Q_H}$ y $PID_{W_L Q_H}$ ”

Con esta relación establecida se comenzó a definir la regla o el algoritmo funcionamiento del “Mecanismo VT”. Se tiene que éste ejecuta las siguientes Acciones:

1. Realiza las medidas(o muestras) necesarias para obtener la curva de “Caída de Presión vs Caudal” del sistema actual (ver Figura 14). En esta acción se adquieren los datos para un número discreto de “n” puntos al inicio de una calibración, al mismo tiempo que se realizan unos diagnósticos previos del funcionamiento del banco.
2. Realiza una estimación de cuan alejada está la curva actual respecto $P_{N_L}(Q)$. Esta distancia debe ser relativa a la distancia entre $P_{N_L}(Q)$ y $P_{W_L}(Q)$ para poder obtener una “proporción”. Este cálculo se realiza para cada uno de los puntos de caudal adquiridos en el numeral 1.

$$d_n = \frac{P_n - P_{N_L}(Q_n)}{P_{W_L}(Q_n) - P_{N_L}(Q_n)}$$

Ecuación 2. Distancia relativa del n-ésimo punto de la curva actual

Donde:

n Muestra n-ésima de la curva “Caída de Presión vs Caudal” actual

d_n Distancia relativa del n-ésimo punto de la curva actual

Q_n N-ésimo valor de Caudal (m^3/h) de la curva actual

P_n N-ésimo valor de Presión (mbar) de la curva actual

$P_{N_L}(Q_n)$ Curva del sistema “sin” carga evaluada en Q_n

$P_{W_L}(Q_n)$ Curva del sistema “con” carga evaluada en Q_n

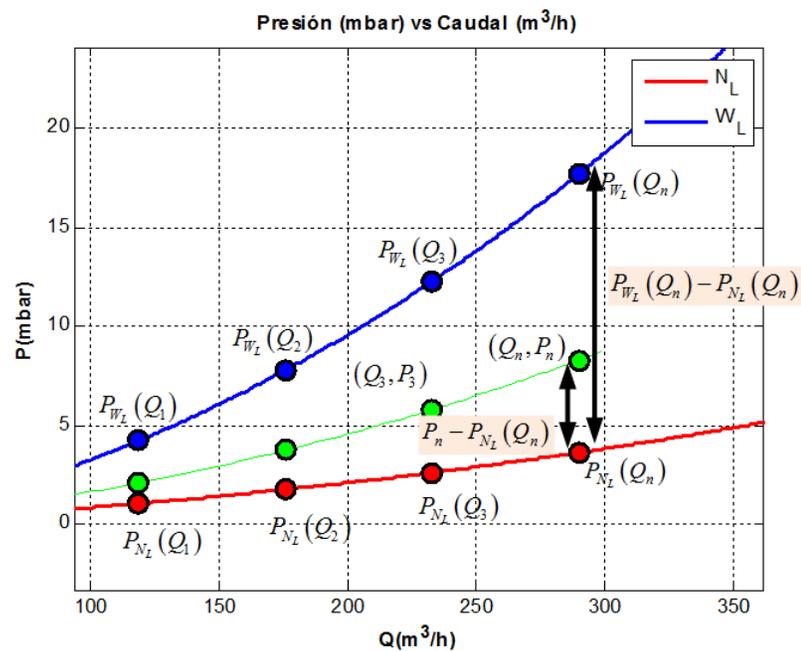


Figura 14. Ejemplo de muestreo de la curva “Caída de Presión vs Caudal” actual.

3. Realiza el promedio de los “n” valores de las distancias obtenidas con el fin de obtener la “proporción” en la que deben variar las constantes PID entre valores de $PID_{N_L Q_H}$ y $PID_{W_L Q_H}$.

$$\alpha = \frac{\sum^m d_n}{m}$$

Ecuación 3. Proporción de las constantes PID

Donde:

- α Proporción de variación de constantes PID entre $PID_{N_L Q_H}$ y $PID_{W_L Q_H}$
- m Número de muestras tomadas
- d_n Distancia relativa del n-ésimo punto de la curva actual

4. Cálculo de los valores PID para ajustar el controlador a las condiciones actuales del sistema. Las operaciones para aplicar esta proporción son las siguientes:

$$PID_{Actual_T1} = PID_{N_L Q_H} + \alpha \cdot (PID_{N_L Q_H} - PID_{W_L Q_H})$$

Ecuación 4. Forma general de la variación entre $PID_{N_L Q_H}$ y $PID_{W_L Q_H}$ (Tramo 1).

$$Kp_{Actual_T1} = Kp_{N_L Q_H} + \alpha \cdot (Kp_{N_L Q_H} - Kp_{W_L Q_H})$$

Ecuación 5. Variación de la constante Proporcional del controlador PID del “Tramo1”.

$$Ki_{Actual_T1} = Ki_{N_L Q_H} + \alpha \cdot (Ki_{N_L Q_H} - Ki_{W_L Q_H})$$

Ecuación 6. Variación de la constante Integral del controlador PID del “Tramo1”.

$$Kd_{Actual_T1} = Kd_{N_L Q_H} + \alpha \cdot (Kd_{N_L Q_H} - Kd_{W_L Q_H})$$

Ecuación 7. Variación de la constante Derivativa del controlador PID del “Tramo1”.

Con estos pasos que queda definido el algoritmo del “Mecanismo VT” para el “tramo 1”. De manera análoga debe aplicarse el funcionamiento de este mecanismo para el “tramo 2”. De ésta manera con el “Mecanismo NL” y Mecanismo VT” definidos se concreta el funcionamiento global del control adaptativo “Gain Schedule” propuesto.

5. SIMULACIÓN DE RESULTADOS

Una vez se ha definido la forma de operación del control adaptativo se procedió a simular su funcionamiento y a observar como es su desempeño.

Con este fin se decidió simular un escenario de operativo del banco de calibración. Para el ejemplo se va a suponer que se tiene como medidor bajo prueba un medidor tipo rotativo referencia G250 de la marca Dresser cuyo intervalo de operación va de 2 m³/h a 400 m³/h. Adicionalmente se va a asumir que genera una caída de presión cuya curva “Caída de Presión vs Caudal” es de una proporción de $\alpha=0.3$. Adicionalmente se simuló el trabajo del controlador en dos valores o puntos de caudal, uno sobre el “Tramo1” igual a 100 m³/h y otro sobre el “Tramo 2” igual a 400 m³/h.

En la Figura 15 se observa la curva “verde” que representa curva “Caída de Presión vs Caudal” de $\alpha=0.3$. Se ejemplifica el muestreo de 10 puntos de la

curva con los que se calcula finalmente. Los círculos negros son los puntos de operación sobre los que se hace la simulación.

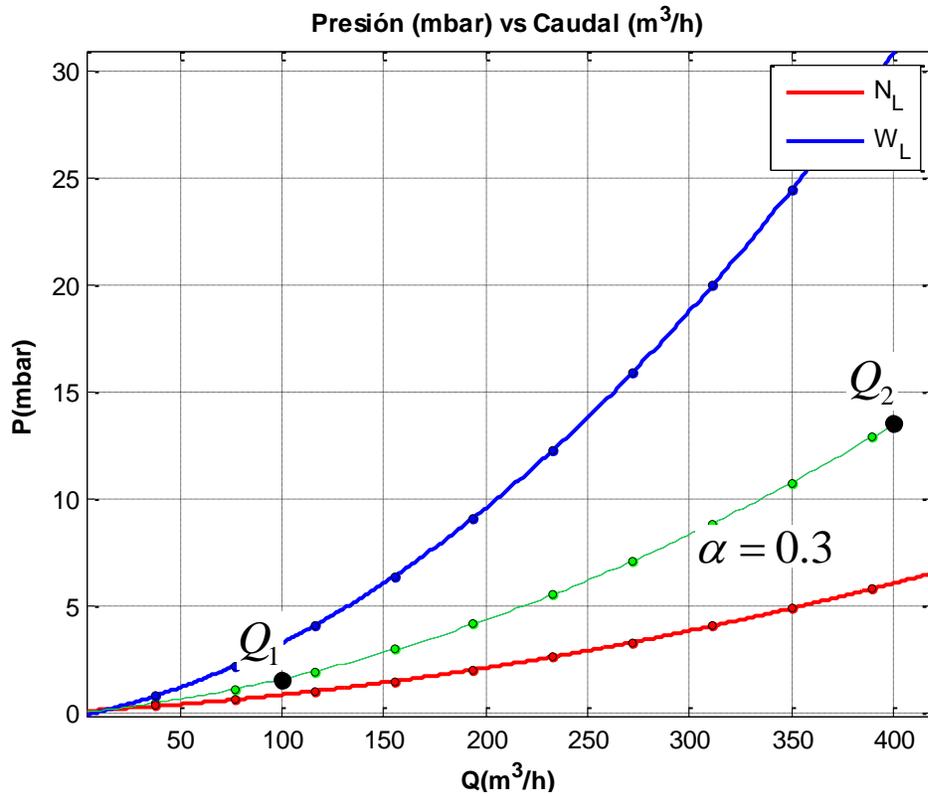


Figura 15. Curva “Caída de Presión vs Caudal” es de una proporción de $\alpha = 0.3$.

- Simulación 100 m³/h

Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$N_L Q_L$ —	$G_1(s)$	0.0025236	0.0020997	0.000000
$W_L Q_L$ —	$G_1(s)G_2(s)$	0.00458012	0.0038108	0.0000000

Actual $\alpha = 0.3$	$G_1(s)G_2(s)$	0.00314058	0.0026130	0.0000000
------------------------------	----------------	------------	-----------	-----------

Tabla 7. Variación de los parámetros PID para ajustarse al punto de operación $100 \text{ m}^3/\text{h}$, con una carga que genera un $\alpha = 0.3$.

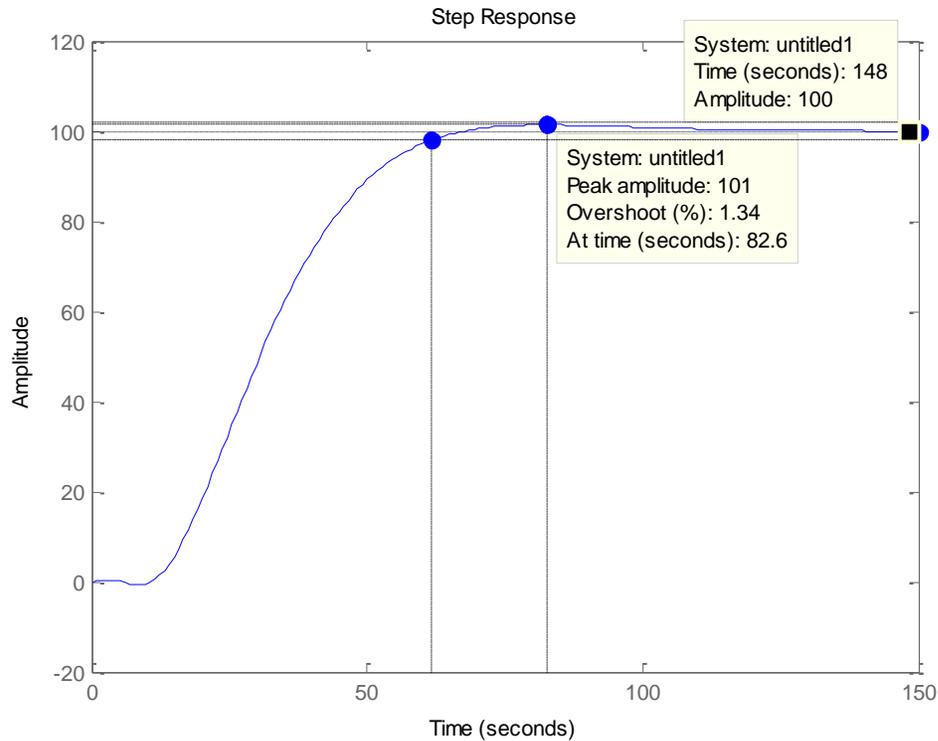


Figura 16. Respuesta del sistema controlado, con adaptación a punto de operación $400 \text{ m}^3/\text{h}$, con una carga que genera un $\alpha = 0.3$.

- Simulación $400 \text{ m}^3/\text{h}$

Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$N_L Q_H$ —	$G_1(s)$	0.0225086	0.0005471	0.14365532
$W_L Q_H$ —	$G_1(s)G_2(s)$	0.0432858	0.0010522	0.27626022
Actual $\alpha = 0.3$	$G_1(s)G_2(s)$	0.0287417	0.0006987	0.18343679

Tabla 8 Variación de los parámetros PID para ajustarse al punto de operación 400 m³/h, con una carga que genera un $\alpha = 0.3$.

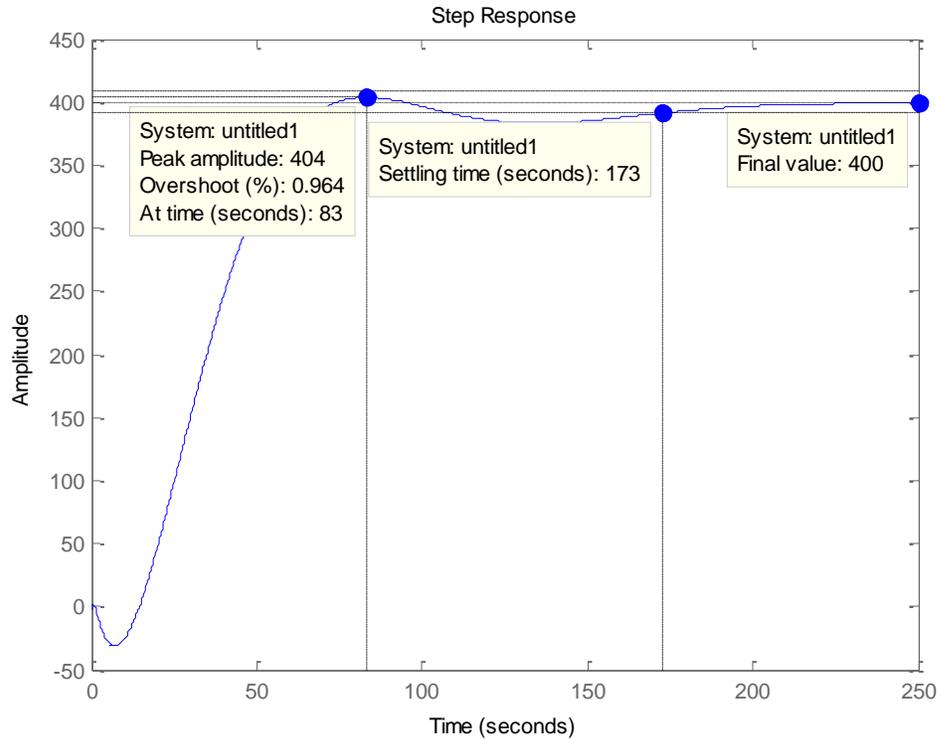


Figura 17. Respuesta del sistema controlado, con adaptación a punto de operación 400 m³/h, con una carga que genera un $\alpha = 0.3$.

Como se observa en la Figura 16 y Figura 17 el sistema responde de acuerdo a las expectativas para las que fue planteado. Responde a los diferentes escenarios operativos entregando una respuesta con las especificaciones de sobrepaso, tiempo de establecimiento y error en estado estable esperadas. Se observa que cuando la inercia del sistema lo permite, como en el caso de 100 m³/h, el control adaptativo mejora el tiempo de establecimiento, obteniéndose un valor en segundos mucho menor que lo que se tenía como objetivo.

6. IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

En los capítulos anteriores se mostraron diferentes actividades de experimentación, análisis y toma de decisiones de las cuales se obtuvo como resultado un diseño de un control adaptativo y la descripción de como funcionan sus mecanismos de adaptación. Luego mediante la simulación de algunos de los casos de operación determinó que es viable implementarlo en la práctica. En este ultimo capitulo se presenta un procedimiento que resume la implementación del controlador en una plataforma de automatización.

6.1. PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN

Para lograr implementar satisfactoriamente este control adaptativo se propone realizar cada una de las siguientes actividades:

1. Realizar un proceso de identificación de la planta $G_1(s)$ (sin carga). Se propone dividir el span de la señal de entrada en por lo menos 10 valores equiespaciado (en este caso 10 valores de corriente del intervalo 4mA hasta el valor que represente el valor de corriente que genere el máximo caudal). Adquirir simultáneamente la “respuesta al escalón” y la curva “pérdida de presión vs caudal”.
2. Simular mecánicamente la planta $G_1(s)G_2(s)$ que es considerado el más crítico de los casos (máximo flujo que logra la planta con la máxima restricción). En esta configuración realizar el proceso de identificación de la planta usando exactamente los mismos valores de

la señal de entrada del numeral 1. Adquirir simultáneamente la “respuesta al escalón” y la curva “pérdida de presión vs caudal”.

En este punto es importante aclarar que el montaje mecánico usado para simular este escenario crítico debe ser totalmente reproducible o debe mantenerse con el fin de usarse más adelante en la sintonización de controladores PID asociados a los tramos para el “Mecanismo NL” del control adaptativo.

3. Mediante un análisis de los datos experimentales conseguidos, revisar el comportamiento no lineal del sistema y establecer diferentes tramos de funcionamiento para el “Mecanismo NL” del control adaptativo.
4. Una vez establecidos los tramos de operación del “Mecanismo NL” sintonizar controladores PID de cada tramo. Se deben sintonizar los controladores para los mismos puntos de trabajo bajo las condiciones $G_1(s)$ y $G_1(s)G_2(s)$ (sin carga y con carga respectivamente).

Para este procedimiento se usan las herramientas que provee cada plataforma de automatización que se esté usando, así como las herramientas propuestas para facilitar este proceso.

5. Basado en el número de tramos y los valores los valores que definen los límites de éstos implementar en el controlador (PLC, PAC u otro) el “Mecanismo NL” que se puede representar por medio de una estructura “if” bastante sencilla.

6. Mediante un procedimiento de análisis de datos y haciendo uso de una herramienta computacional obtener las ecuaciones cuadráticas que representan las curvas de “pérdida de presión vs caudal” del escenario $G_1(s)$ y $G_1(s)G_2(s)$ (sin carga y con carga respectivamente).
7. Una vez obtenidas las ecuaciones cuadráticas que representan las curvas de “pérdida de presión vs caudal” del escenario $G_1(s)$ y $G_1(s)G_2(s)$ realizar la implementación del algoritmo que realiza el cálculo de las distancias relativas d_n y la proporción α detalladas en la sección 4.1.3.
8. En base a las parejas de constantes PID obtenidas por tramos y con el algoritmo de la proporción α realizado Implementar las ecuaciones de PID actual (equivalente al “Mecanismo VT”) de cada uno de los tramos del “Mecanismo NL”.
9. Por último organizar la logística y e implementar el algoritmo necesario para realizar las mediciones para adquirir la curva de “pérdida de presión vs caudal” del sistema en la configuración actual. Con esta implementación queda configurado totalmente el “Mecanismo VT”. Esto significa que puede ponerse en marcha el Control Adaptativo.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Se logró desarrollar un método para implementar un controlador adaptativo “Gain Schedule” que responde ante la no linealidad y variación en el tiempo propias del sistema de generación de flujo de un banco de calibración de medidores de gas.

El sistema permite optimizar el tiempo necesario para una calibración, sin descuidar la integridad del medidor, ni la precisión en el valor del caudal ajustado dado que su control se adapta a cada escenario de operación con la rapidez óptima, que causa niveles de sobre paso dentro de lo permisible y con un error en estado estacionario igual a cero.

Se estableció que es posible llevar a la práctica el control adaptativo propuesto mediante un protocolo de pruebas de caracterización , haciendo uso de una herramienta de cálculo que permita realizar el análisis de los datos obtenidos y mediante los recursos provistos por las plataformas de automatización para la sintonización de controladores PID.

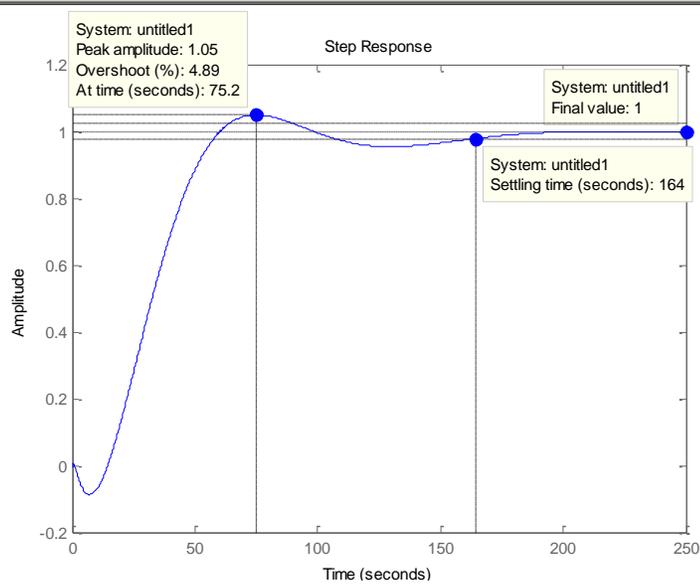
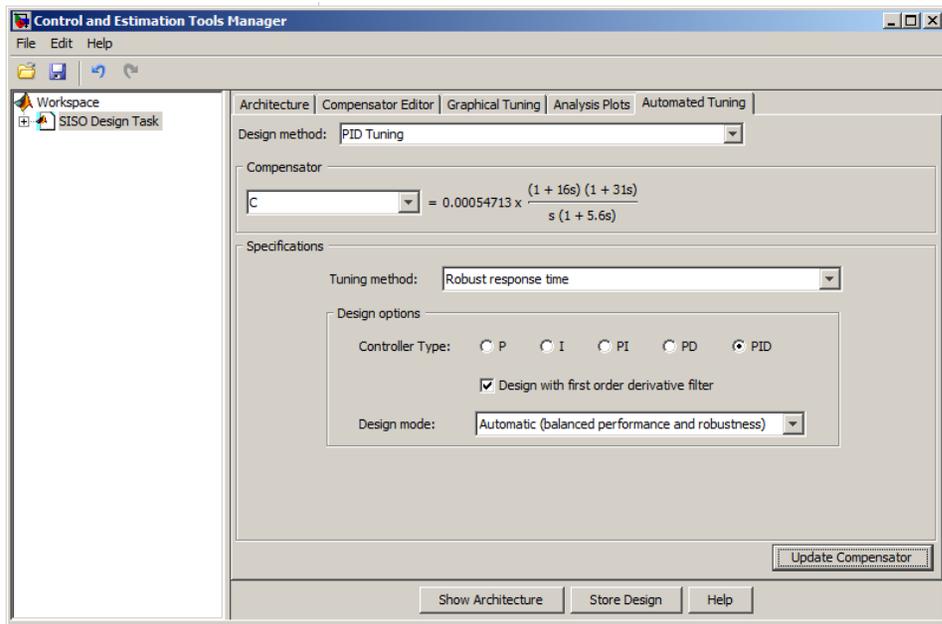
El control adaptativo desarrollado es vulnerable a posible ruido en las señales de presión y a los fenómenos de resonancia propios de algunas tecnologías de medidores de gas, por lo cual es importante implementar mecanismos que detecten estos inconvenientes y permitan realizar las acciones correctivas pertinentes. Teniendo estas precauciones el sistema funciona de manera adecuada.

8. REFERENCIAS

- [1] BIPM, JCGM 200:2008 Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y Términos asociados (VIM). Traducción al español del VIM 3ª.
- [2] Phisikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, “Contadores volumétricos de gas”, Reglamento de Prueba Tomo 4, 1992.
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, “Medidores de Gas Tipo diafragma” Norma Técnica Colombiana NTC 2728, 2005.
- [4] American National Standards Institute ANSI, “B109.1 Diaphragm-Type Gas Displacement Meters (Under 500 Cubic Feet Per Hour Capacity)”, 2000.
- [5] American National Standards Institute ANSI, “B109.2 Diaphragm-Type Gas Displacement Meters (500 Cubic Feet Per Hour Capacity and Over)”, 2000.
- [6] American National Standards Institute ANSI, “B109.3 Rotary-Type Gas Displacement Meters”, 1992.
- [7] American Gas Association AGA, “Report No. 7, Measurement of Natural Gas by Turbine Meter”, 2006.
- [8] International Organization of Legal Metrology OIML, “R 137-1 and -2 (E) Gas meters Part 1: Metrological and Technical Requirements, Part 2: Metrological Controls and Performance Tests”, 2010.
- [9] Aström, Karl J., “Adaptive Control”, Second Edition. Dover Publications , 2008.
- [10] Petros A. Ioannou, “Adaptive Control Tutorial”, Cambridge University Press, 2006
- [11] Acerca de Opto 22. Documento introductorio. Disponible: www.opto22.com.
- [12] W. M. Miller. *Flow Measurement Engineering Handbook*, McGrawHill, United States of America. 1996.

**ANEXO 1. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES
PID**

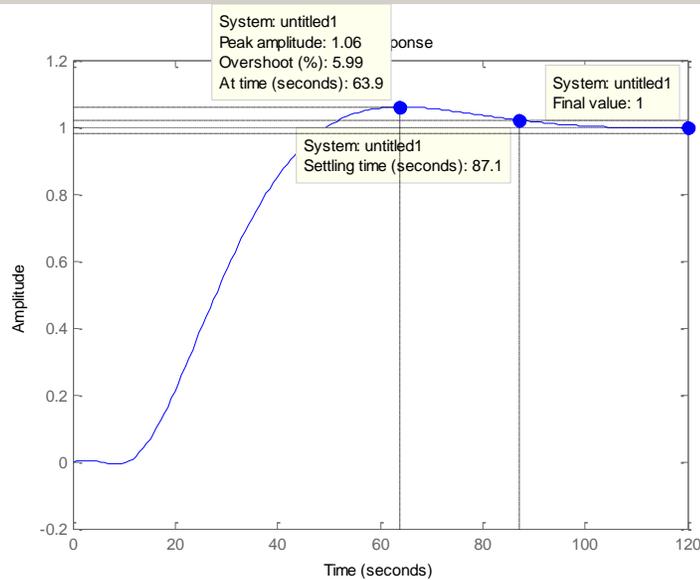
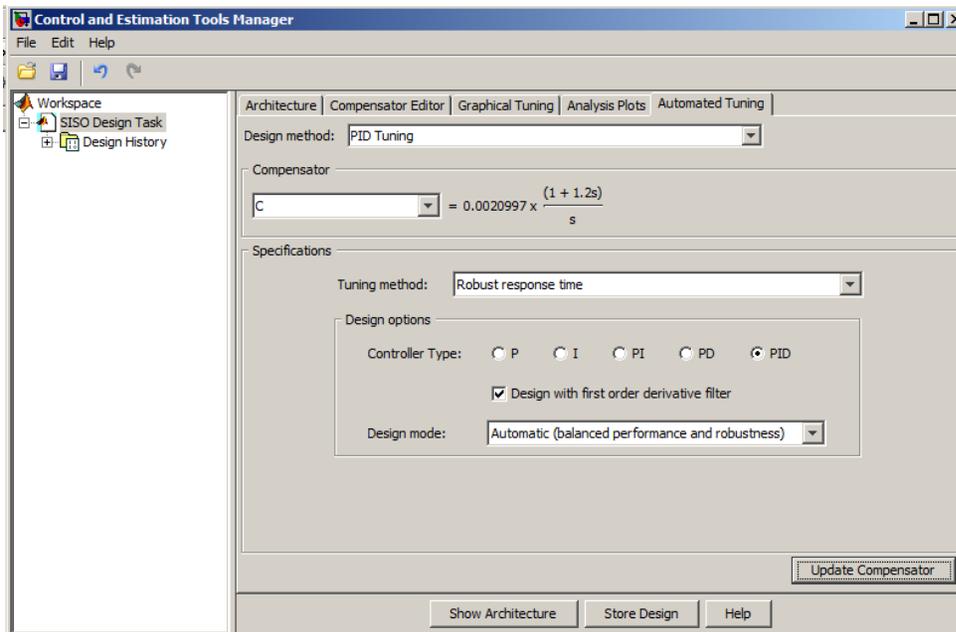
- **Sistema 1**



Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$N_L Q_H$	$G_1(s)$	0.0225086	0.0005471	0.14365532

Controlador PID	Planta (Escenario)	Ts[s]	%OS	%EeEE
$N_L Q_H$	$G_1(s)$	164	4.89	0

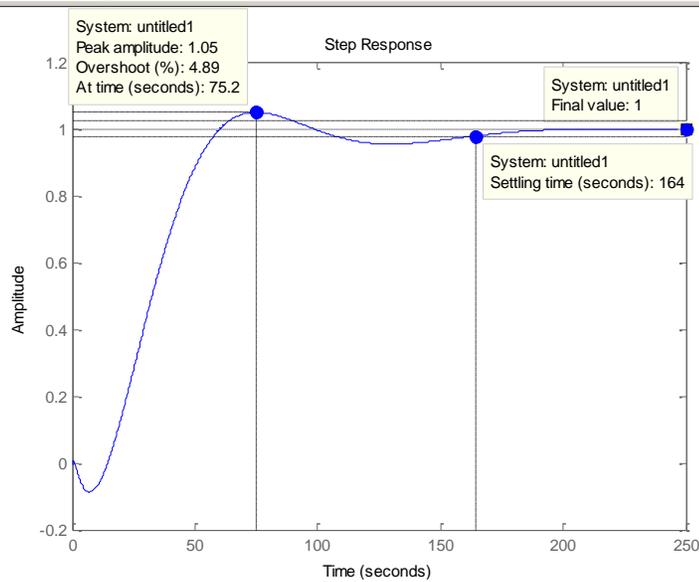
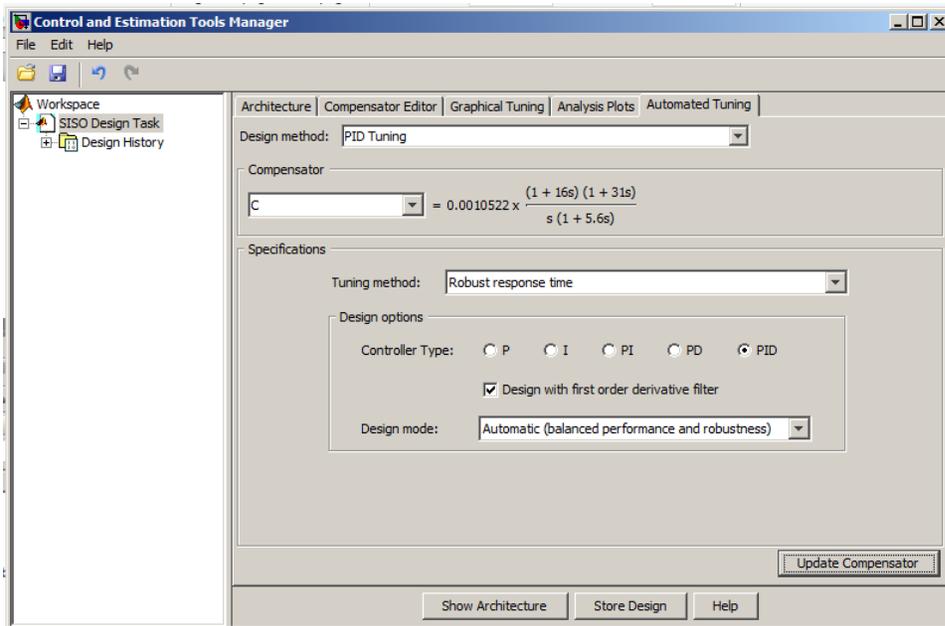
• Sistema 2



Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$N_L Q_L$ _____	$G_1(s)$	0.0025236	0.0020997	0.000000

Controlador PID	Planta (Escenario)	Ts[s]	%OS	%EeEE
$N_L Q_L$ _____	$G_1(s)$	87.1	5.99	0

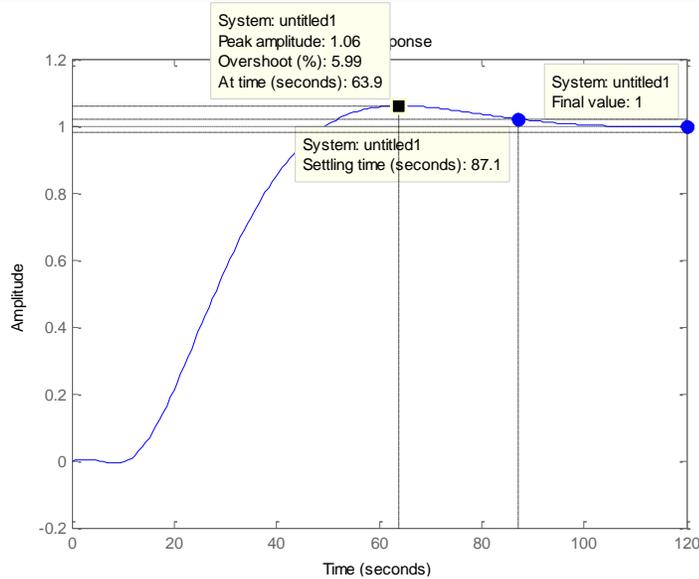
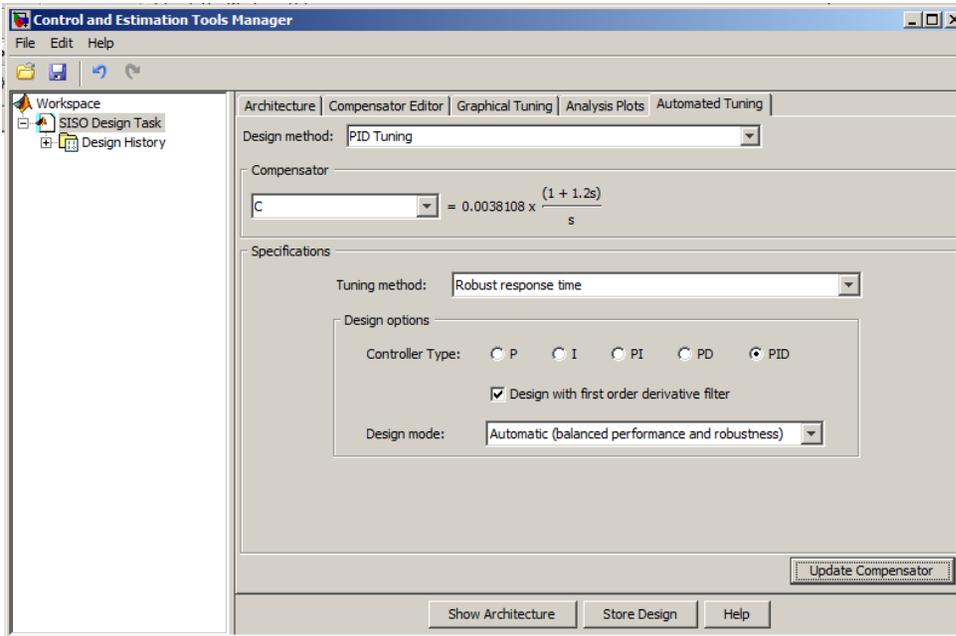
- **Sistema 3**



Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$W_L Q_H$ _____	$G_1(s)G_2(s)$	0.0432858	0.0010522	0.27626022

Controlador PID	Planta (Escenario)	Ts[s]	%OS	%EeEE
$W_L Q_H$ _____	$G_1(s)G_2(s)$	164	4.89	0

• Sistema 4



Controlador PID	Planta (Escenario)	CONSTANTES		
		Kp	Ki	Kd
$W_L Q_L$ _____	$G_1(s)G_2(s)$	0.00458012	0.0038108	0.0000000

Controlador PID	Planta (Escenario)	Ts[s]	%OS	%EeEE
$W_L Q_L$ _____	$G_1(s)G_2(s)$	87.1	5.99	0